

ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO EN ZONAS URBANAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE GRANADA

SERGIO IGLESIAS ASENJO*, CLEMENTE IRIGARAY FERNÁNDEZ** y JOSÉ CHACÓN MONTERO***

Recibido: 1-11-06. Aceptado: 15-01-07. BIBLID [0210-5462 (2006-2); 39: 147-166].

PALABRAS CLAVE: Sistemas de Información Geográfica, riesgo sísmico, vulnerabilidad sísmica, Granada.

KEY WORDS: Geographical Information Systems, seismic risk, seismic vulnerability, Granada town.

MOTS-CLEFS: Systèmes d'Information Géographique, risque sismique, vulnérabilité sismique, Grenade.

RESUMEN

El análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas ha carecido tradicionalmente de estudios que lo abordaran de forma integral. En general, o bien sólo se consideran los aspectos relacionados con la calidad en la edificación sin tener en cuenta el efecto de sitio, o bien sólo se estudia la peligrosidad. La evaluación del riesgo debe abordar, además de la estimación de la sismicidad y el efecto de su amplificación y atenuación, la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Mediante las herramientas de los SIG, en este trabajo se estima, con carácter preliminar y de forma rápida y sencilla, la vulnerabilidad de los edificios de la ciudad de Granada en función de diferentes factores. A partir de la vulnerabilidad y considerando la máxima magnitud esperada de un terremoto en el entorno de la cuenca Granada ($M_w = 6.5$), se evalúa el riesgo sísmico, expresado por el número de edificios afectados y el grado de pérdidas previsible, así como su efecto sobre la población. Finalmente, se discute el grado de incertidumbre de los resultados obtenidos y su significado. Igualmente se discute la necesidad de profundizar en la determinación del riesgo en las infraestructuras lineales y edificios singulares no abordados en este trabajo.

ABSTRACT

The analysis of seismic hazard in urban areas frequently is not made considering all the necessary studies. In general, only those aspects related to building quality are considered without any consideration to site effects or, alternatively, only the seismic hazard is focused. A seismic risk assessment is obtained not only from an estimation of the seismicity and its

* Ayuntamiento de Granada. sergioiglesias@granada.org

** Universidad de Granada. clemente@ugr.es

*** Universidad de Granada. jchacón@ugr.es

amplification or attenuation effects, but also considering the vulnerability of the elements at risk. Using GIS tools, in this paper, first a preliminary, quick and easy estimation of the vulnerability of the buildings in Granada town is obtained from different factors. Then, considering the expected maximum earthquake in the Granada basin ($M_w = 6.5$), the seismic risk is assessed, as expressed by the number of affected buildings and the likely degree of losses, as also its effects on the population. Finally, the degree of uncertainty of the obtained results and its meaning as an indicative approach are discussed. Also, the need of a deeper consideration of the risk assessment of linear structures and singular buildings not analysed in this research is pointed out.

RÉSUMÉ

Les analyses de risques provoqués par les tremblements de terre en zones urbaines ont trop peu souvent abordé le problème de manière complète; on a porté une attention spéciale à la qualité de la structure des bâtiments sans prendre en compte leur emplacement ou on n'a calculé que le facteur danger. L'estimation de la magnitude sismique d'un possible séisme se devrait d'être accompagnée de la vulnérabilité des éléments qui pourraient y être exposés lorsque s'effectue l'évaluation des risques en cas de tremblement de terre. Ce travail (grâce à l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique) offre une estimation à caractère préventif, à la fois rapide et simple, sur la vulnérabilité des bâtiments de la ville de Grenade (Espagne) en fonction de différents facteurs. À partir de la vulnérabilité de ses bâtiments y considérant la magnitude sismique maximale à laquelle on pourrait s'attendre autour de la vallée de Grenade ($M_w = 6,5$), le risque sismique est évalué en prenant en compte le numéro d'édifices qui seraient touchés, l'ampleur des pertes prévisibles et les effets d'un séisme donnée sur la population. Finalement, la validité des résultats obtenus et ses implications comme forme d'évaluation du taux de risques y sont discutés. On aborde également la nécessité d'aller plus en profondeur dans l'évaluation des risques pour les infrastructures linéaires et les bâtiments à structure unique, thème qui n'ont pas été traités dans ce travail.

1. INTRODUCCIÓN

El énfasis sobre la importancia de la peligrosidad en los estudios de riesgo sísmico se remonta a la década de los años ochenta y noventa (MARTÍN, A. J., 1983; MARTÍN, A. J. y GARCÍA YAGÜE, A., 1986; MARTÍN, A. J., 1989, 235-244). En España, sólo en Barcelona y Cataluña se han realizado estudios integrales como base de Planes Especiales de Protección Civil (CHÁVEZ, J., 1998, 343; CID, J. y Otros, 1999, 69).

Si lo que se pretende es la estimación del riesgo, indudablemente el estudio y evaluación de la peligrosidad es fundamental; sin embargo, también lo es, incluso en mayor medida puesto que sobre ella podemos actuar, el estudio y análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Granada no es una excepción, encontrándose en la zona con mayor peligrosidad sísmica de España, con los valores más elevados de aceleración sísmica básica de toda la geografía nacional (0.23g, CPNS, 2002).

Son multitud los estudios que han analizado aspectos de la peligrosidad sísmica en la ciudad (CHEDDADI, A., 2001) y su entorno, sobre todo en la depresión de

Granada (PELÁEZ, J. A. y LÓPEZ CASADO, C., 2001, 175-188; REICHERTER, K. R., 2001, 267-282; MORALES, J., 1991). Sin embargo, no se han acometido estudios de vulnerabilidad, aprovechando los conocimientos de peligrosidad de que disponemos. Esto, en gran parte, es resultado de la dificultad intrínseca del análisis y caracterización de los elementos de una ciudad —los edificios—. Son muchas las variables a tener en cuenta y no sólo las propias del edificio (cimentaciones, estructuras, alturas, localización, geometría en planta, distribución de masas, etc.) sino también las relaciones entre ellos (efecto aplauso, etc.).

Este trabajo pretende dar un primer paso en esta dirección, estableciendo una metodología que permita estimar, con carácter preliminar y de una forma rápida y sencilla, la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico para un hipotético escenario sísmico más desfavorable. Este escenario viene dado por la máxima magnitud esperada para el entorno de la cuenca de Granada.

Es importante resaltar el hecho de que el concepto de riesgo tiene una connotación de probabilidad, que nosotros hemos obviado al calcularlo en el caso de que se produzca el evento sísmico más severo que cabe esperar en la zona de estudio, de modo que lo que se evalúa realmente es un escenario de daños para este evento, aunque por motivos metodológicos, se parte del concepto de riesgo. Esta concepción tiene un gran interés, sobre todo, para los servicios de Protección Civil en el entorno de una ciudad.

La metodología se ha desarrollado mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), y los resultados se expresan a escala de edificio.

2. METODOLOGÍA

El punto de partida para la evaluación del riesgo será su Ecuación General (UNDRO, 1979):

$$R_t = E \times R_s = E \times H \times V$$

Donde:

R_t: Riesgo total

R_s: Riesgo específico

H: Peligrosidad

V: Vulnerabilidad

E: Elementos en riesgo

De todos estos conceptos, la peligrosidad así como los elementos en riesgo se han estimado a partir de diversas fuentes, de las cuales se han procesado y seleccionado los datos referentes a peligrosidad, microzonación sísmica (efecto de sitio) y elementos en riesgo (nº de edificios, población en riesgo, etc.). La vulnerabilidad y el riesgo sísmico, principales objetivos de este trabajo, se han evaluado mediante el uso de un SIG a partir de los datos recopilados previamente. En secciones posteriores se describirá en detalle el procedimiento utilizado.

2.1. Peligrosidad

La evaluación del riesgo sísmico requiere el conocimiento de la magnitud esperada para un período de retorno determinado. A falta de mayor información de tipo paleosísmico, los períodos de retorno utilizados en este trabajo son los obtenidos por las relaciones empíricas que determinan los órdenes de magnitud de las fallas de la zona. Aunque el nivel de incertidumbre es alto, los períodos obtenidos para distintas fallas de la depresión de Granada oscilan entre 3000 y 7000 años, según la falla considerada (PELÁEZ, J. A. y LÓPEZ CASADO, C., 2001, 175-188).

La magnitud máxima esperada para estos períodos de retorno se ha estimado mediante distintos métodos: paleosismicidad (REICHESTER, K. R., 2001), historia sísmica (VIDAL, F., 1999; ESPINAR MORENO, M., QUESADA, J. J. y MORCILLLO, J. D., 1994, 108), relaciones empíricas (PELÁEZ, J. A. y LÓPEZ CASADO, C., 2001, 175-188) y tectónica activa (SANZ DE GALDEANO, C., PELÁEZ, J. A. y LÓPEZ CASADO, C., 2001, 158-175). El valor considerado para el entorno de la depresión de Granada ha sido de 6.5 Mw.

Como se ha indicado anteriormente, para los objetivos del trabajo, se ha considerado una peligrosidad $H=1$; es decir, se considera el caso hipotético de que se produzca el evento sísmico más severo (terremoto de 6.5 Mw), dicho de otra forma, que la probabilidad de que el suceso potencialmente dañino (terremoto de 6.5 Mw) ocurra es del cien por cien.

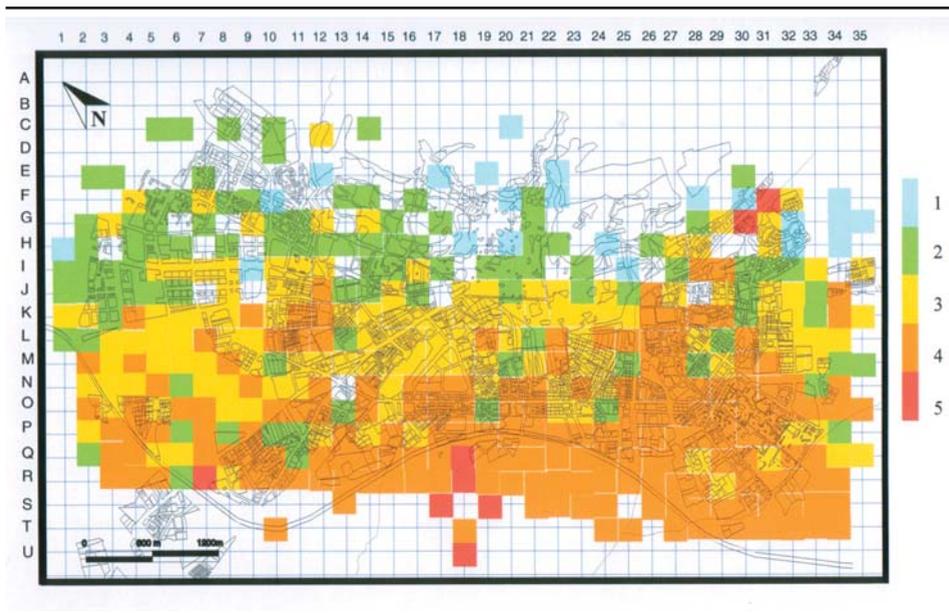
2.2. Microzonación sísmica

En regiones como las Béticas donde la sismicidad es moderada y ocasionalmente grande, la influencia que las condiciones de la estructura geológica superficial tienen en la modificación de las características de la sacudida sísmica es de gran importancia.

El hecho de que la ciudad de Granada se asiente sobre una cuenca sedimentaria con series potentes de materiales recientes poco consolidados que además son acuífero, implica que puedan darse fenómenos de amplificación local (dependiente de la frecuencia de la onda sísmica), además de influenciar en efectos inducidos como la atenuación y duración de la sacudida. Estas características de la respuesta local del terremoto han de ser evaluadas con una serie de métodos que emplean datos de microterremotos, terremotos de baja magnitud, microtemores, etc. sin tener que esperar a que ocurran grandes terremotos que nos pongan de manifiesto las características de estas respuestas locales. A partir de la memoria de tesis de MORALES, J. (1991) y de CHEDDADI, A. (2001), sabemos los efectos inducidos por la geología superficial para todos estos fenómenos en la Depresión de Granada y en la ciudad de Granada respectivamente. En general, ambos trabajos se integran dentro de las líneas de investigación sobre microzonación, sobre la base de las cuales se ha podido discriminar distintas áreas con distintas respuestas ante las ondas sísmicas en la ciudad de Granada.

Para este trabajo, nos centramos fundamentalmente en la Tesis de CHEDDADI, A. (2001), pues geográficamente resultaba más acorde a nuestros propósitos. Para caracterizar el comportamiento del suelo, utiliza distintos criterios (frecuencias de llegada, geotecnia, piezometría y efectos secundarios) algunos de los cuales se han contrastado con otros trabajos; características geotécnicas del suelo (HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C., 1998, 616), piezometría (CASTILLO, A., 1984) y efectos secundarios (CHACÓN, J., LÓPEZ CASADO, C., RODRÍGUEZ, I. e IRIGARAY, C., 1989, 601-620; PASCUAL, G., CARREÑO, E. y MARTÍN, A. J., 1994). No encontrando divergencias de peso para realizar una nueva microzonación, al menos en lo que se refiere a los efectos secundarios (licuefacción y deslizamientos). Sin embargo en lo que se refiere a la geotecnia y piezometría, aunque se realizó una georreferenciación y digitalización del mapa de condiciones de cimentación superficial de la ciudad de Granada (HERNÁNDEZ DEL POZO, J. C., 1998, 616) para poder compararlo, no fue posible debido a que Cheddadi presenta en el mapa geotécnico ambos criterios conjuntamente. De modo que finalmente se optó por considerar como válida la microzonación propuesta por Cheddadi (Figura 1), aunque con modificaciones (Figura 2).

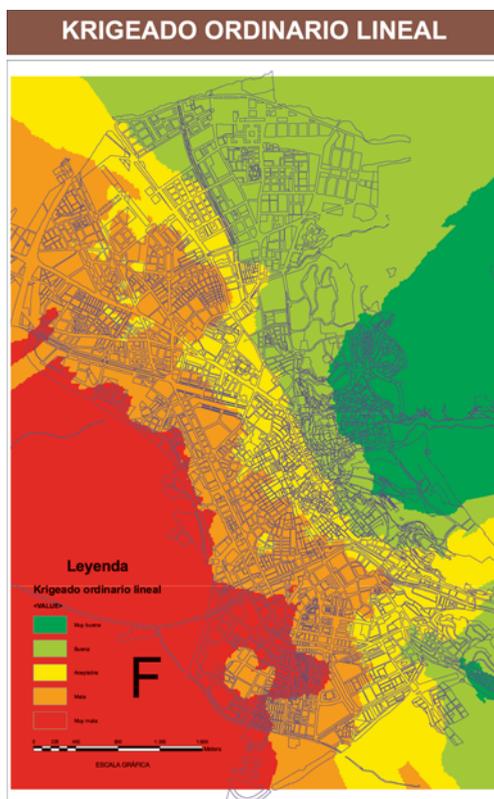
Figura 1. *Microzonación sísmica en base a períodos predominantes, geotecnia, piezometría y efectos secundarios*



Respuesta del terreno: 1: muy buena; 2: buena; 3: aceptable; 4: mala; 5: muy mala.

FUENTE: Cheddadi, A. (2001).

Figura 2. *Microzonación sísmica obtenida a partir de la figura 1 tras aplicar krigeaje lineal ordinario*



2.3. Tratamiento de los datos

Una vez seleccionadas las fuentes, procedimos a tratar los datos para adecuarlos al procesamiento al que se iban a someter posteriormente. Para ello consideramos necesario realizar una interpolación de los datos discretos procedentes del mapa original (figura 1), construyendo una información espacial continua que eliminara los vacíos de información que éste presentaba. Se eligió el krigeaje por ser un método de interpolación que tiene en cuenta la desemejanza de una variable cuando sus valores se observan en puntos que están separados por una distancia concreta. Se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón, este patrón de variación espacial se estudia mediante el variograma, función vectorial que cuantifica la variación entre un dato en un punto y otro dato en otro punto, en las distintas direcciones del espacio. Nos decantamos por el krigeaje ordinario lineal, ya que se le

considera el mejor estimador de una variable a partir de información experimental. Además después de probar en el SIG distintos modelos de krigging (ordinario, universal), comprobamos que era el que respetaba más fielmente la microzonación original, así mismo también resultaba más acorde con las cartografías geotécnicas con las que se había contrastado la microzonación de Cheddadi.

La microzonación, expresa la respuesta del terreno ante un evento sísmico, en base a los criterios utilizados por Cheddadi (frecuencias de llegada de los trenes de ondas sísmicas, geotecnia, piezometría y efectos secundarios). En general se aprecia un progresivo deterioro de la respuesta del terreno de noreste a sudoeste. Las mejores respuestas coinciden casi exactamente con los afloramientos de la Formación Alhambra, empeorando a medida que pasamos a terrazas aluviales antiguas y posteriormente recientes.

2.4. *Elementos en Riesgo*

En la evaluación de los elementos en riesgo, y para esta primera fase, sólo se han tenido en cuenta el número de edificios y el número de personas, dejamos para un estudio en mayor profundidad, la determinación de elementos en riesgo tales como las líneas vitales o «life lines» es decir; carreteras, líneas férreas, eléctricas, telefónicas, abastecimiento de agua, o bien edificios que por su singularidad merecen una atención específica como, hospitales, cuarteles, centros administrativos, docentes, etc.

Para nuestra evaluación preliminar de vulnerabilidad y riesgo sísmico, el número de edificios se puede conseguir con relativa facilidad (al menos en España), por medio de datos catastrales que nos facilitan en formato digital el número de viviendas de la ciudad con datos bastante actualizados, además esta información incluye variables de mucha utilidad a la hora de determinar la vulnerabilidad sísmica, como: año de construcción, número de alturas, reformas, etc. Estas variables serán las que utilicemos más adelante para determinar la calidad en la edificación.

El cálculo del número de personas si entraña mayores complicaciones, porque si bien a través de datos censales podemos saber la población de derecho con exactitud, no ocurre lo mismo con la de hecho, que es la que interesa a efectos de la determinación del riesgo real en caso de un evento sísmico en la ciudad. Para ello, se tuvieron en cuenta para el caso de Granada además de la población de hecho, la aportada por la universidad, el turismo y la influencia que supone el tener un área metropolitana de envergadura, donde mucha gente trabaja y hace vida en la ciudad. La universidad aporta unas 25.000 personas (no residentes en Granada), el turismo unas 6.000 personas/día, la influencia del extrarradio se cifró en unas 80.000 personas (el 50 % de la población de los pueblos situados a no más de 10 km.). La población de derecho (censada) es de 250.000 habitantes. Estos valores se han obtenido del Instituto de Estadística de Andalucía (1999) y se han redondeados al alza, pues no se pretende mayor exactitud, lo que se pretende es la estimación del número de personas que se encuentran en la ciudad un día cualquiera, y para ello basta conocer una cifra aproximada y sobredimensionada como factor de seguridad. Para todos los cálculos la población de hecho se establece en 361.000 habitantes (IGLESIAS ASENJO, S., 2002, 110).

3. VULNERABILIDAD SÍSMICA

La determinación de la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones, es un problema de gran complejidad que ha de ser abordado de diferentes formas en función de la escala de trabajo. Son multitud las variables que influyen en la vulnerabilidad de un edificio; cimentación, estructura, antigüedad, altura, geometría en planta y en altura, respuesta del terreno (ubicación geográfica), distribución de masas, relación con otros edificios, etc. el conocimiento de todos estos factores implica un ingente trabajo de campo, si lo que pretendemos es la evaluación de la vulnerabilidad en una gran ciudad, lo cual en la mayoría de los casos hace los proyectos inviables.

En este trabajo se plantea una metodología sencilla, rápida y barata que permite una evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica en la edificación, teniendo en cuenta algunos de los factores que la controlan, concretamente:

- Estructura.
- Cimentación.
- Altura (resonancia).
- Respuesta sísmica del terreno (microzonación).

Las variables estructura y cimentación, se agrupan en un solo factor que llamaremos *Calidad en la edificación*, para ello clasificaremos los datos referentes a la fecha de construcción de los edificios (obtenidos del Catastro), en cuatro grandes grupos:

- Anterior a 1950.
- Desde 1950 a 1974.
- Desde 1975 a 1995.
- Posterior a 1996.

La clasificación del parque edificatorio en cuatro períodos, responde a la evolución histórica de la construcción y al progreso de la Normativa legal y técnica, que ha supuesto hitos importantes en el control y seguridad frente al sismo.

El primer período corresponde, fundamentalmente, a tipologías estructurales de muros de carga y estructuras de madera sin arriostrar. La constitución de los muros de carga es variable en función sobre todo de la edad y el uso (muros de tapial, mampostería, sillares, ladrillo.)

En el segundo período, el parque edificatorio mejora sus condiciones de resistencia frente a las acciones sísmicas; especialmente a partir de 1970, que coincide con un incremento del proceso constructivo. Ello se debe a la utilización de nuevos materiales (hormigón en masa y armado), y al avance de la normativa técnica de obligado cumplimiento:

- Norma Básica PGS-1 de 1968, operativa con la aprobación de NTE-ECS/1973.

- Norma MV 201-1972 «Muros resistentes de fábricas de ladrillo».
- Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (1968).
- Instrucción EH-73.

El tercer período se inicia con otro hito normativo, la aprobación de la Norma Sismorresistente PDS-1 (1974), que aborda de forma sistemática el cálculo de estructuras frente a las acciones sísmicas. En este período se construyen, en volumen relevante, edificios con estructura de acero; de hecho en 1976 se aprueba la revisión de la *Norma MV-102-1975 (Acero laminado para estructuras de edificación)*.

El último período, debido al desarrollo económico y social alcanzado, el proceso edificatorio se caracteriza por un mayor control y calidad en la ejecución, impulsado por los nuevos desarrollos normativos:

- Norma de construcción sismorresistente NCSE-94 (CPNS, 1994).
- Ley de Ordenación de la Edificación. Ley 38/1999.
- Norma de construcción sismorresistente NCSE-02 (CPNS, 2002).
- Ley de Ordenación Urbanística de Andalucía. Ley 7/2002.

A partir de estos datos se elabora una matriz alfanumérica (tabla 1) que permite relacionar, de forma genérica, la edad de las edificaciones con su tipo de estructura y cimentación, utilizando este criterio se han integrado los datos en el SIG. Esto nos permite definir cartográficamente la calidad en las viviendas.

Para la representación cartográfica se utilizó la codificación de colores tipo «semáforo», pero en vez de utilizar 3 colores se han discriminado 5 niveles de calidad, de modo que hubiese un paralelismo con las clases de vulnerabilidad establecidas por la Escala MacroSísmica Europea, EMS-92, para posteriormente, poder correlacionarlas con las diferentes clases de vulnerabilidad y riesgo (GONZALEZ, M.; CHÁVEZ, J.; GOULA, X. y SUSAGNA, T., 1999). Para este trabajo, sin embargo, se han unido en un solo grupo los edificios de calidad muy baja y baja, puesto que los de baja, que corresponden con viviendas históricas nobles con estructuras de sillería y menor vulnerabilidad —respecto de los de muy baja—, hay que reconocerlos uno a uno y no se han incluido (actualmente en fase de elaboración). Sin embargo en ciudades históricas, como Granada, donde supongan un volumen considerable, es importante tenerlos en cuenta llegando a formar un grupo diferenciado. Una fuente fiable para reconocerlos rápidamente, es a través de las bases de datos de Edificios catalogados que suelen tener los ayuntamientos. En la figura 3 se presenta, parcialmente para poder apreciarlo en detalle, el Mapa de Calidad en la Edificación, elaborado con los criterios expuestos.

Una vez establecida la calidad estamos en situación para abordar la Vulnerabilidad de la edificación. La propuesta que realizamos para el análisis de la vulnerabilidad, consta de dos fases.

Tabla 1. *Calidad en la edificación en función de las características constructivas y fecha de construcción*

Año de Construcción	Características constructivas	Grado de calidad constructiva				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Anterior a 1950	Cimentación por cantos rodados o piedras sueltas y estructuras de muros de carga en adobe, tapial, piedra suelta o ladrillo.	■	■			
	Cimentación por cantos rodados o piedras sueltas y estructuras de sillería.		■	■		
De 1950 a 1974	Cimentación por zapata aislada y estructura de hormigón sin diseño antisísmico.		■	■	■	
De 1974 a 1995	Cimentación por zapata arriostrada y estructura de hormigón armado o de acero laminado con diseño antisísmico mínimo.			■	■	
Posterior a 1995	Cimentación por zapata arriostrada o losa y estructura de hormigón armado o de acero laminado con diseño antisísmico alto.				■	■

Más probable
 Posible

3.1. Primera fase

Determinación de la vulnerabilidad, sin definir cuantitativamente (CARDONA, O. M., 1985), teniendo en cuenta como factores determinantes la *calidad en la edificación* y la *microzonación sísmica*, relacionados por medio de la matriz de la tabla 2.

Existe una asimetría en la matriz de vulnerabilidad, que se explica por la diferencia de comportamiento ante los movimientos horizontales (cizalla) entre las estructuras por muro de carga y las estructuras por pilar. Además se han tenido en cuenta para la elaboración de la matriz el comportamiento de los muros de carga en terremotos recientes en la misma zona (Alhama de Granada, 1884 y Albolote-Atarfe, 1956). Al haberse incluido los edificios históricos esta asimetría no es muy marcada, cuando los edificios catalogados se saquen de este grupo será más marcada.

Figura 3. *Detalle del mapa de calidad en la edificación*

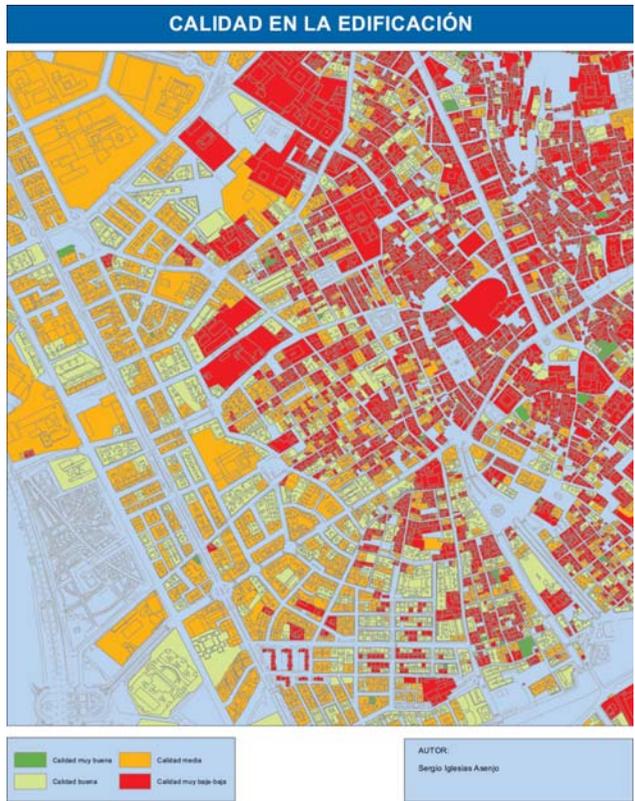


Tabla 2. *Matriz de vulnerabilidad sísmica*

Susceptibilidad sísmica	Calidad en la edificación				
	Muy baja-baja	Baja-media	Media	Media-alta	Muy alta-alta
Muy alta	Extremadamente alta	Muy alta	Muy alta	Media	Baja
Alta	Extremadamente alta	Alta	Alta	Media	Baja
Media	Muy alta	Alta	Media	Media	Baja
Baja	Muy alta	Media	Media	Baja	Muy baja
Muy baja	Alta	Media	Baja	Muy baja	Muy baja

Como comentamos con anterioridad también se consideró, además de la calidad y la microzonación, otro parámetro de singular importancia; la altura de la edificación: Conocida la distribución de períodos predominantes de llegada de las ondas sísmicas en el espacio (CHEDDADI, A., 2001), y previa evaluación de los períodos naturales de oscilación de los edificios (Método simplificado de cálculo de la NCSE-94 (CPNS, 1994), asumidas las condiciones de contorno como válidas para nuestro caso), establecer una comparación entre ambos resultados que nos permitiera conocer en qué zonas de la ciudad se pueden generar fenómenos de resonancia (Figura 4). Este método de cálculo establece distintas fórmulas en función del tipo de estructura: muros de carga, hormigón armado y acero laminado. Nosotros para poder relacionarlos con nuestra clasificación previa por fecha de construcción (tabla 1), asumimos, nuevamente, esos estilos estructurales a fechas (anterior a 1950 y posterior a 1950, tabla 3). De modo que un edificio construido en 1960 tiene una estructura de hormigón armado sin diseño antisísmico, por tanto tendrá una calidad media y un período natural de oscilación que corresponde con $0.09n$ siendo n el número de alturas, este dato (n), como comentamos en puntos

Figura 4. Detalle del mapa de susceptibilidad a fenómenos de resonancia para distintos períodos de oscilación

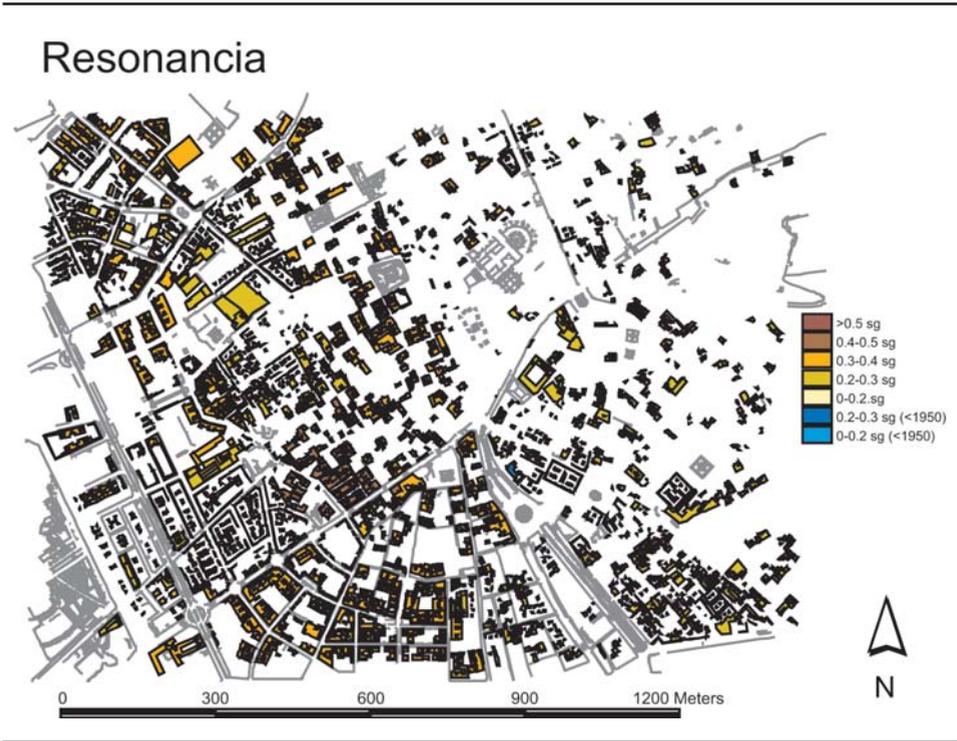


Tabla 3. *Períodos de oscilación de los edificios en función de altura y fecha de construcción*

Período de construcción	Período fundamental de los edificios en función de sus características constructivas		Período natural de oscilación de los edificios					
	$T_F = 0,06H \frac{\sqrt{H/(2L+H)}}{\sqrt{L}}$		Dimensión en planta L (m)	10	10-16	18-22	24-28	30-36
Anterior a 1950			Altura del edificio H (m)	0-9	12-21	24-30	33-39	42-51
			Período de oscilación	0-0,1	0,14-0,2	0,21-0,24	0,26-0,28	0,3-0,33
			n.º de plantas	0-3	4-7	8-10	11-13	14-17
Posterior a 1950	Hormigón Armado	T = 0,09 n	Período de oscilación	0-0,27	0,36-0,63	0,72-0,9	0,99-1,17	1,26-1,53
			n.º de plantas	0-3	4-7	8-10	11-13	14-17
	Acero Laminado	T = 0,11 n	Período de oscilación	0-0,33	0,44-0,77	0,88-1,1	1,21-1,43	1,54-1,87
			n.º de plantas	0-3	4-7	8-10	11-13	14-17

H = Altura de la edificación en metros

n = Número de plantas sobre rasante

L = Dimensión en planta de la edificación en el sentido de la orientación de la oscilación

Según Método Simplificado de Cálculo de la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94).

anteriores, lo podemos extraer de los datos catastrales. La limitación aparece en la asimilación de los edificios de estructura de acero laminado a hormigón armado, ya que a priori, no podemos saber cuales tienen una estructura u otra. En cualquier caso la asunción que realizamos a hormigón armado, no debe establecer diferencias de peso, en tanto en cuanto las estructuras de acero laminado son minoría, la formulación difiere poco y además las diferencias se establecen hacia un punto de vista conservador.

En la Figura 4, podemos apreciar que la resonancia se calcula para distintos rangos de períodos. Los períodos de oscilación más pequeños corresponden a edificios de pocas alturas y estructuras más rígidas (muros de carga), mientras que los más altos, corresponden a edificios más altos y con estructuras más flexibles. Como datos significativos destacaremos; el 42% de los edificios de Granada son susceptibles de resonar en caso de terremoto y de ese 42 %, el 66% lo hace para períodos de entre 0,2-0,3 sg. (3-4 alturas).

De cara a la vulnerabilidad los edificios que presenten fenómenos de resonancia, incrementarán en un grado la vulnerabilidad resultante de la matriz (tabla 2). Así un edificio que tenga una vulnerabilidad media (por su calidad y ubicación), pasa a tenerla alta, si es susceptible de manifestar resonancia.

3.2. Segunda fase

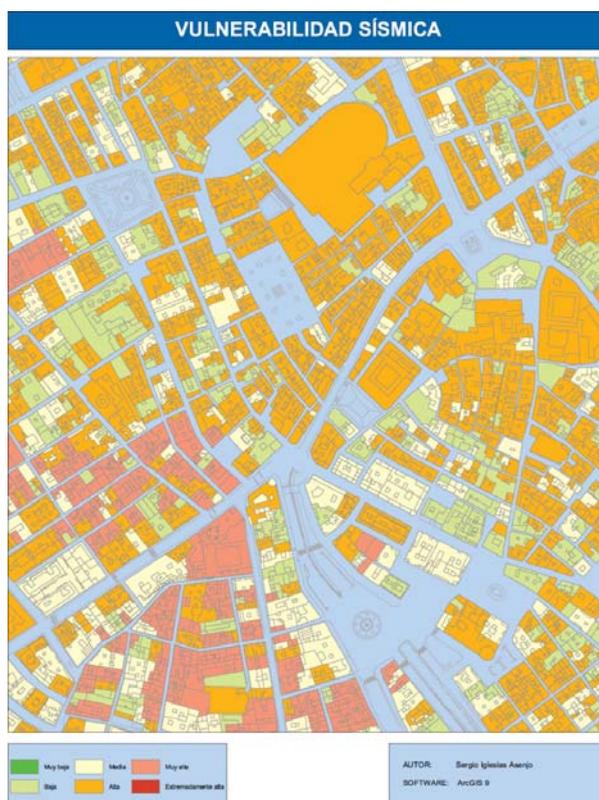
En esta fase cuantificaremos, por medio de una matriz, el número de viviendas que sufrirán un tipo de daño para la intensidad máxima esperada ($I_{EMS} = X \approx 6.5$ Mw). Esta matriz (Tabla 4) enfrentará las seis clases de vulnerabilidad generadas anteriormente (Tabla 2) —y que a su vez se corresponden con los grados de vulnerabilidad de la EMS-92—, con los grados de daño definidos por la EMS-92:

Grado de daños (tabla 4): G0: sin daños; G1: despreciables a ligeros; G2: moderados; G3: sustanciales a graves; G4: muy graves; G5: destrucción.

Clase de vulnerabilidad (tabla 2): A: extremadamente alta; B: muy alta; C: alta; D: media; E: baja; F: muy baja.

En la definición de los grados de intensidad de la escala EMS-92, se indica la cantidad de casas de un tipo que sufren un cierto grado de daño; así por ejemplo, para intensidad VIII y edificios de clase de vulnerabilidad B se indica: «muchos sufren

Figura 5. Detalle del mapa de vulnerabilidad sísmica



daños de grado 3; algunos de grado 4». Esto supuso un problema para la elaboración de la matriz, puesto que hay que cuantificar de alguna manera conceptos ambiguos como «muchos» o «algunos». Para ello contemplamos valores que indican el daño mínimo que se produce para una intensidad; pocas (8%), algunas (27%), bastantes (35%), muchas (45%), la mayoría (80%). La suma de cada uno de los grados de vulnerabilidad, ha de ser siempre del 100%, este hecho nos permite evaluar el resto de porcentajes (Simulador de Escenarios Sísmicos, DGPC, 2002).

En la Tabla 5 se muestra un resumen con los resultados de vulnerabilidad en la edificación. En la figura 6, podemos observar que la expresión gráfica de los resulta-

Tabla 4. *Matriz del grado de daños en la edificación*

$I_{EMS} = X$	A	B	C	D	E	F
G0	0	0	0	0	20	65
G1	0	0	0	20	45	27
G2	0	0	20	45	27	8
G3	0	20	45	27	8	0
G4	20	45	27	8	0	0
G5	80	35	8	0	0	0

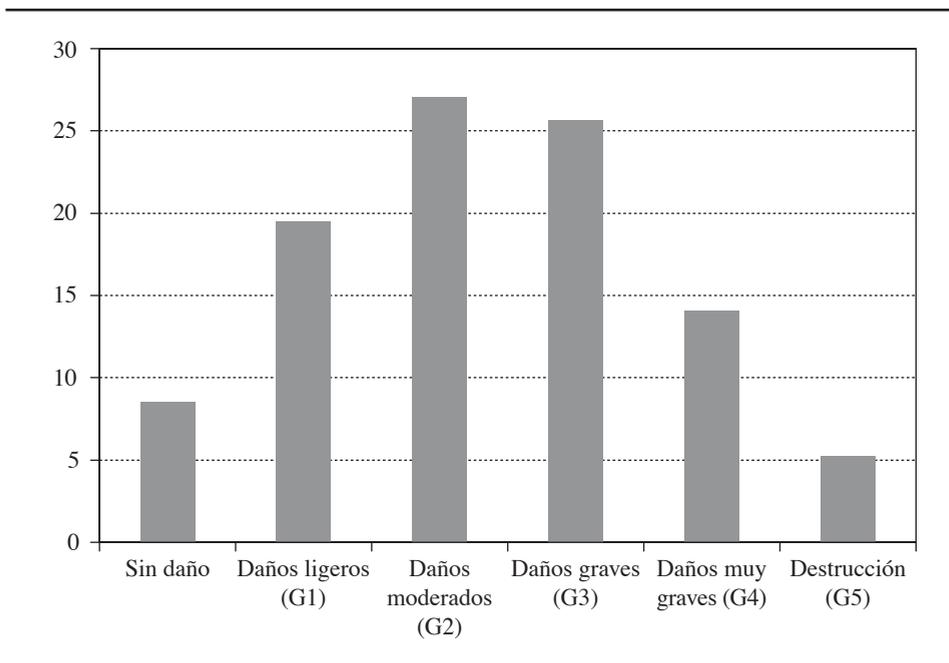
Grado de daños: G0: sin daño, G1: despreciables a ligeros, G2: moderados, G3: sustanciales a graves, G4: muy graves, G5: destrucción.

Vulnerabilidad: A: extremadamente alta, B: muy alta, C: alta, D: Media, E: baja, F: muy baja.

FUENTE: Simulador de Escenarios Sísmicos, SES 2002.

Tabla 5. *Resultados del análisis cualitativo de vulnerabilidad sísmica, para un terremoto de 6,5 M_w en la ciudad de Granada*

Grado de vulnerabilidad	Extrem. alta	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	TOTAL	%
n° viviendas	226	5.540	25.857	22.792	22.672	3.590	80.677	
%	0,28	6,87	32,05	28,25	28,1	4,45	100	
Sin daño	0	0	0	0	4.535	2.334	6.869	8,51
Daños ligeros								
□□□(G1)	0	0	0	4.558	10.202	969	15.729	19,50
Daños moderados								
□□□(G2)	0	0	5.171	10.256	6.121	287	21.835	27,06
Daños graves								
□□□(G3)	0	1.108	11.636	6.154	1.814	0	20.712	25,67
Daños muy graves								
□□□(G4)	45	2.493	6.981	1.824	0	0	11.343	14,06
Destrucción								
□□□(G5)	181	1.939	2.069	0	0	0	4.189	5,20

Figura 6. *Distribución del grado de pérdidas en la edificación*

dos se acerca mucho a una distribución normal (campana de Gauss). La media la encontramos ligeramente desplazada hacia los daños más leves, la dispersión (varianza) no es demasiado acusada de modo que la mayor probabilidad en los daños la encontramos para G1, G2 y G3. Los resultados parecen bastante acordes al conocimiento que a priori teníamos del estado de la ciudad, además la ley de probabilidad gaussiana, la encontramos en la mayoría de los fenómenos que observamos en la naturaleza, lo cual de alguna manera valora positivamente los resultados.

4. RIESGO SÍSMICO

Para este trabajo, como se comentó con anterioridad, se va a evaluar el riesgo total para la población es decir, número de pérdidas humanas y heridos, más o menos graves, para un terremoto hipotético de magnitud 6.5 Mw. Sería también factible la evaluación del Riesgo en la edificación, a partir de la cuantificación del grado de daño en los edificios y realizando una valoración económica de éstos daños, pero el parque edificatorio es tan heterogéneo que el resultado de una valoración media de éste, nos parece demasiado ambiguo.

No hay metodologías que tengan un alto grado de fiabilidad para la estimación de este tipo de riesgo, dado el alto número de parámetros que intervienen (variaciones

diarias, estacionales, daños indirectos, etc). Consecuentemente, los resultados generados por las metodologías precisadas a continuación, están sujetos a errores importantes y deben tomarse como indicadores muy aproximados de la hipotética realidad. De hecho, en muchos estudios no se considera el riesgo poblacional, presentándose únicamente los valores de población expuesta.

De las metodologías más comunes, nos decantamos por los métodos mixtos; se basan en la utilización de porcentajes de muertos y heridos en estructuras según el tipo de daño sufrido (G1, G2, G3, G4, y G5), lo cual implica el conocimiento de la matriz de vulnerabilidad de las estructuras. Es la aproximación más realista, pero tiene la limitación de que los daños poblacionales dependen no sólo del daño del edificio, sino también del tipo de estructura (una casa de mampostería colapsada produce mayor mortandad que una de estructura metálica o de madera).

Dado el alto grado de incertidumbre, el cálculo se realizó con dos métodos:

Mediante las fórmulas simplificadas de TIEDEMAN, H. (1992, 951); COBURN, A., SPENCE, R. y POMONIS, A. (1992, 5989-5994) y GÜLKAN, P. y SUCUOGLU, H. (1992, 539-543):

- N° de muertos = $G5 \times 0.30 \times Om$
- N° de heridos = $6 \times N^\circ \text{ de muertos}$
- N° de personas sin hogar = $Cl \times Om$

Siendo:

- $G5$: n° de casas colapsadas
- Om : n° de ocupantes = n° habitantes / n° de viviendas
- Cl : n° casas inhabitables = 100% $G5$ + 100% $G4$ + 50% $G3$
- $G4$: n° de casas con daños muy graves
- $G3$: n° de casas con daños sustanciales a graves

La población expuesta (n° de habitantes), se estableció en 361.000 personas y el número de viviendas nos lo da el catastro, 80.677 edificios.

Mediante la metodología propuesta por el Consejo de Tecnología Aplicada de California (ATC, 1985,492) (ver tabla 6).

Tabla 6. Cuadro de cálculo para la estimación de heridos y muertos

Grado de daño	Heridos leves	Heridos graves	Muertos
1	3,3/10000	1,1/25000	1,1/100000
2	3/1000	1/25000	1/10000
3	3/100	1/250	1/1000
4	3/10	1/25	1/100
5	2/5	2/5	1/5

FUENTE: Applied Technology Council (ATC, 1985).

Como ya hemos comentado, la variabilidad es enorme de aplicar una metodología a otra, sin embargo nos permite establecer unos márgenes sobre los que nos podemos encontrar en caso de un evento sísmico de intensidad X, magnitud 6.5 Mw: El número de muertos oscilará entre 1.000 y 5.000 personas, mientras que el número de heridos lo hará entre 8.000 y 30.000 personas.

5. CONCLUSIONES

En resumen, podemos concluir que se ha presentado una metodología que permite evaluar la vulnerabilidad en la edificación (básicamente residencial) y el riesgo total en la población —parámetros que son tradicionalmente evitados a la hora de ser estudiados dada su complejidad—, de una manera relativamente sencilla, rápida y barata.

La validación de los resultados es difícilmente realizable, dado el riesgo que estamos tratando, pero no parece que los resultados sean descabellados por el conocimiento que de la cuenca de Granada y de los terremotos sucedidos en el pasado. No tener en cuenta la localización espacial de los edificios (efecto de sitio), lleva en la evaluación de la vulnerabilidad y posteriormente del riesgo, a errores inadmisibles.

Parece que el siguiente paso lógico en la evolución de esta metodología rápida de evaluación de vulnerabilidad y riesgo por medio de Sistemas de Información Geográfica, sería la introducción progresiva de otros parámetros determinantes en las matrices de vulnerabilidad. Actualmente trabajamos en la determinación del número de edificios con estructura de sillería (edificios catalogados), estos se deben tener en cuenta al menos en ciudades con un patrimonio histórico extenso. Además, sería factible la introducción de variables como la geometría en planta, o la exención de los edificios sin elevar ni el costo ni el tiempo del estudio significativamente.

En lo que se refiere al riesgo, ha quedado patente la gran incertidumbre que se genera en los resultados, por lo que estas cifras deben tomarse como meros indicadores, que pueden tener gran importancia para Protección Civil y los seguros, donde las cuantificaciones tienen un gran valor aunque sean de modo aproximado. En este aspecto también sería conveniente profundizar en la determinación del riesgo en las líneas vitales y edificios, mediante el uso de matrices de valoración económica por tipo de edificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATC (1985) *Earthquake damage evaluation data for California*, Applied Technology Council ATC-13 Report, Redwood City, California, 492 págs.
- CARDONA O. M. (1985) *Hazard, vulnerability and risk assessment*. Unedited working paper. Institute of earthquake engineering and engineering seismology. IZIIS, Skopje, Yugoslavia.
- CASTILLO, A. (1984) *Estudio Hidroquímico del acuífero de la vega de Granada*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.

- CHACÓN J., LÓPEZ CASADO, C., RODRÍGUEZ I., IRIGARAY C. (1989) *Evaluación del riesgo de licuefacción derivado de la actividad sísmica en la comarca de Granada*. Encuentro Internacional «Catástrofes y Sociedad», 601- 620. Ed: Fundación MAPFRE.
- CHÁVEZ, J. (1998) *Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 343 págs.
- CHEDDADI, A. (2001) *Caracterización sísmica del subsuelo de la ciudad de Granada mediante el análisis espectral del ruido de fondo sísmico y la exploración de ondas de cizalla horizontales*. Tesis doctoral. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, Univ. Granada.
- CID, J. y Otros (1999) *Evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona*. Informe 030299 del Ayuntamiento de Barcelona. Servicio de Protección Civil. 69 págs.
- COBURN, A., SPENCE, R. y POMONIS, A. (1992) *Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse*. Proceedings of the X World Conference on Earthquake Engineering. Madrid (España), 10. 5989-5994.
- CPNS (1994) *Norma de construcción sismorresistente: Parte General y edificación (NCSE-94)*. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- , (2002) *Norma de construcción sismorresistente: Parte General y edificación (NCSE-02)*. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- DGPC (2002) *Simulador de Escenarios Sísmicos (SES 2002)*. Dirección General de Protección Civil.
- ESPINAR MORENO, M.; QUESADA, J. J. y MORCILLO, J. D. (1994) *Terremotos en Granada (Siglos XV-XVI)*. Edificación y Sismicidad. Arraez editores, Almería, 108 págs.
- GONZÁLEZ, M.; CHÁVEZ, J.; GOULA, X. y SUSAGNA, T. (1999) *Metodología para determinar a nivel regional los efectos sísmicos en edificios utilizando la escala Macrosísmica EMS-92*. Informe ICC-GS-125/99.
- GÜLKAN, P. y SUCUOGLU, H. (1992) *Earthquake vulnerability, loss and risk assessment in Turkey*. Proceedings of the X World Conference on Earthquake Engineering. Madrid (España), 1. 539-543.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, J. C. (1998) *Análisis Metodológico de la Cartografía Urbana Aplicada a la Ciudad de Granada*. Memoria de Tesis. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada. 616 págs.
- IGLESIAS ASENJO, S. (2002) *Estudio de Riesgos Naturales del Municipio de Granada*. Informe técnico, Excmo. Ayuntamiento de Granada, 110 págs.
- MARTÍN, A. J. (1983) *Riesgo sísmico en la Península Ibérica*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- MARTÍN, A. J. y GARCÍA YAGÜE, A. (1986) *Estimación, para su aplicación a Protección Civil, de los daños que un terremoto catastrófico ocasionaría en Andalucía*. IGN nº17.
- MARTÍN, A. J. (1989) *Probabilistic seismic hazard analysis and damage assessment in Andalusia (Spain)*. Tectonophysics, 167: 235-244.
- MORALES, J. (1991) *Caracterización de la respuesta sísmica local en las cuencas de Granada (España) y Ciudad Guzmán (México) mediante el análisis espectral de microtemores y terremotos*. Tesis Doctoral. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, Universidad de Granada.
- PASCUAL, G., CARREÑO, E. y MARTÍN, A. J. (1994) *Microzonación sísmica basada en Sistemas de Información Geográfica. Zona de estudio: Ciudad de Granada y su entorno*. Modulo I: Licuefacción. Instituto Geográfico Nacional.

- PELÁEZ, J. A., y LÓPEZ CASADO, C. (2001) *Peligrosidad Sísmica en la Cuenca de Granada*. En: La cuenca de Granada: Estructura, tectónica activa, sismicidad y dataciones existentes, C. SANZ DE GALDEANO, J. A. PELÁEZ MONTILLA y A. C. LÓPEZ GARRIDO (Eds), 175-188.
- REICHERTER, K. R. (2001) *Paleoseismologic advances in the Granada basin (Betic Cordilleras, Southern Spain) [Progresos paleosismológicos en la cuenca de Granada (Cordilleras Béticas, sur de España)]* Acta Geologica Hispanica 36 (3-4), 267-282.
- SANZ DE GALDEANO, C.; PELÁEZ, J. A. y LÓPEZ CASADO, C. (2001) *Potencialidad sísmica de las fallas de la Cuenca de Granada*. En: La cuenca de Granada: Estructura, tectónica activa, sismicidad y dataciones existentes, C. SANZ DE GALDEANO, J. A. PELÁEZ MONTILLA y A. C. LÓPEZ GARRIDO (Eds), 158-75.
- TIEDEMANN, H. (1992) *Earthquakes and Volcanic Eruptions*. Swiss Re. 951 págs.
- UNDRO (1979) *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Report of Expert Group Meeting, Geneva.
- VIDAL, F. (1999) *Microzonificación sísmica en áreas urbanas del Sureste de España*. Universidad de Granada, Universidad de Almería.